

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ИННОВАЦИОННОГО ТИПА

### ПРОЛИВНОЙ СТЕНД ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСР С ПИД РЕГУЛЯТОРОМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

<sup>1</sup>Асипцов Я. О., <sup>1</sup>Исаков Н. Ю., <sup>2</sup>Акифьева Н. Н., <sup>1</sup>Беавоги П., <sup>1</sup>Сиссе А.

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>УралОРГРЭС, Екатеринбург, Россия

e-mail: asiptzoff@mail.ru, worldoffice@yandex.ru, nna\_1@mail.ru, beavoguipepe87@gmail.com, alsicce1@gmail.com

**Аннотация.** Конфигурация лабораторного гидравлического стенда, созданного на кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ, позволяет безопасно изучать неустойчивые режимы регулирования расхода жидкости на физической модели, благодаря чему реальные системы не подвергаются опасности при подборе параметров настройки ПИД регуляторов в системах регулирования расхода. На установке также возможна калибровка расходомеров. Стенд оснащен двухконтурным регулятором, внутренний контур которого (контур исполнительного механизма) выполнен как контур-«позиционер» частоты питающего напряжения циркуляционного насоса, внешний – как контур регулирования технологического параметра, в частности расхода, по заданной программе.

**Ключевые слова:** САУ, ПИД регулирование, неустойчивость, гидродинамическая аналогия, критерий подобия, измерение расхода.

### POURING STAND FOR PHYSICAL STUDY OF INFLUENCE OF SETTING PARAMETERS OF ACP WITH PID REGULATOR ON THE STABILITY OF FLUID FLOW CONTROL REGIME

Y. Asiptsov<sup>1</sup>, N. Isakov<sup>1</sup>, N. Akif'eva<sup>2</sup>, P. Beavogi<sup>1</sup>, A. Sisse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>State Regional Power Station Operation Organization

e-mail: asiptzoff@mail.ru, worldoffice@yandex.ru, nna\_1@mail.ru, beavoguipepe87@gmail.com, alsicce1@gmail.com

**Abstract.** The configuration of the laboratory hydraulic stand created at the Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources of the UrFU allows the safe study of unstable regimes of liquid flow control on a physical model, in order to secure real systems while selecting PID settings in flow control systems. Calibration of flowmeters is also possible on the installation. The booth is equipped with a two-loop regulator, the internal circuit of which (the loop of the actuator) is designed as a "positioner" circuit of the circulation pump supply voltage frequency, external - as a process control loop, in particular flow, that sticks to a predetermined program.

**Key words:** PID control, ACS, flowmeter calibration, flow measurement, hydrodynamic analogy, similarity criterion, plumbing.

## 1. Введение

Конфигурация лабораторного гидравлического стенда, созданного на кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УРФУ, разрабатывалась с целью безопасно изучать неустойчивые режимы регулирования расхода на физической модели в процессе подбора параметров настройки ПИД регуляторов в системах регулирования расхода, что позволяет не подвергать опасности реальные системы. Установка так же предоставляет возможность калибровки расходомеров.

Установка представляет собой гидравлический стенд, включающий циркуляционный контур, бак-компенсатор объема, систему контрольно-измерительных приборов. Стенд оснащен САУ (системой автоматического управления) с ПЛК «Unitronics v570» и контроллером частоты марки АВВ. Данный стенд может использоваться как для испытания, наладки и калибровки средств измерений расхода однофазных жидкостей, так и для исследования переходных процессов в системах с регулированием расхода посредством ПИД регулятора. То есть этот стенд можно рассматривать как физическую модель АСР с регуляторами расхода.

## 2. Устройство стенда

Общие характеристики гидравлического стенда:

- максимальный расход жидкости – до  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- давление на напоре насоса –  $0,61 \text{ МПа}$ ;
- температура жидкости – от температуры окружающей среды;
- предел относительной погрешности определения расхода с помощью калиброванного объема и таймера, реализованного на контроллере «Unitronics v570» –  $0,25\%$  от значения расхода.

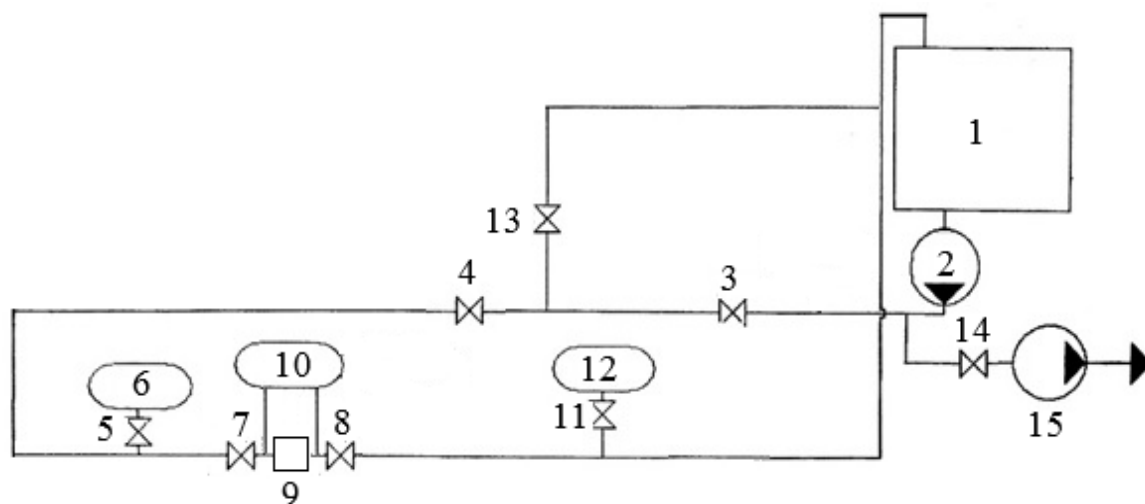


Рис. 1. Принципиальная схема гидравлического стенда: 1 – бак-компенсатор объема (калиброванный объем); 2 – циркуляционный насос; 3-5, 7, 8, 11, 13, 14 – ручные вентили; 6, 12 – преобразователи давления с унифицированным выходным сигналом  $4..20 \text{ мА}$ ; 9, 10 – преобразователь расхода (датчик обратной связи АСР или калибруемый датчик); 15 – дренажный насос.

Гидравлический контур выполнен из нержавеющей стали (08Х18Н10Т) Ду50, общая протяженность контура составляет 50 м. Способ калибровки преобразователей расхода – проливка с точным замером времени заполнения калиброванного объема.

### 3. Реализованное на стенде автоматическое регулирование

Стенд оснащен двухконтурным регулятором, внутренний контур которого (контур исполнительного механизма) выполнен как контур-«позиционер» частоты питающего напряжения циркуляционного насоса.

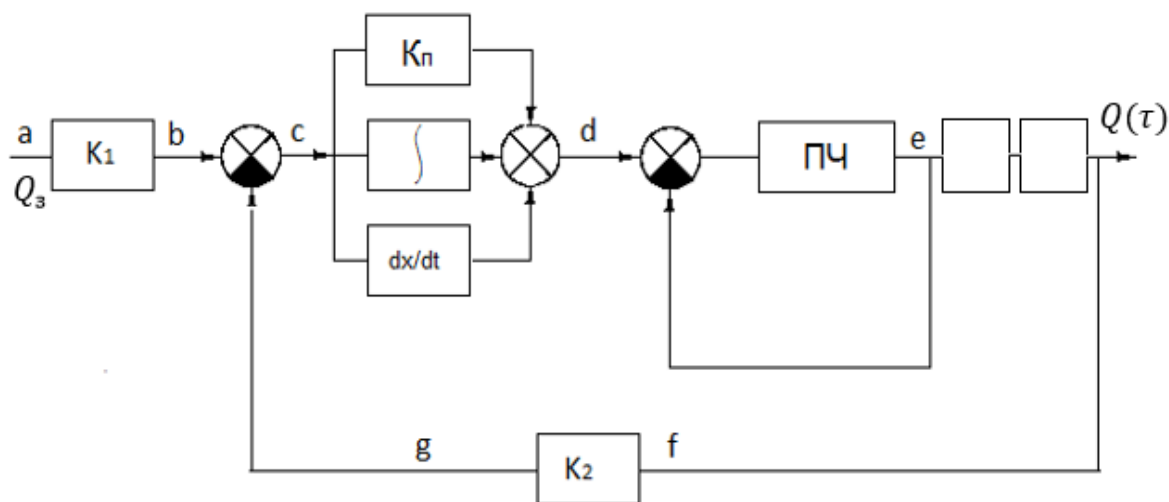


Рис. 2. Схема АСР:  $a$  – сигнал задания расхода ( $Q_3$  – заданный расход);  $b$  – преобразованный сигнал задания расхода;  $c$  – ошибка;  $k_1$  – коэффициент перевода задания в проценты нормирующей величины;  $K_p$  – пропорциональное звено ПИД регулятора;  $\int$  – интегральное звено;  $dx/dt$  – дифференциальное звено;  $d$  – сигнал ПИД регулятора (задание по частоте питающего напряжения насоса); ПЧ – преобразователь частоты; Н – насос Grundfos MMG160MA-2-42FF300-102; О – объект регулирования (гидравлический контур);  $K_2$  – коэффициент преобразования расхода в проценты нормирующей величины;  $f$  – расход;  $g$  – сигнал от датчика расхода в % нормирующей величины

Внешний контур выполнен как контур регулирования технологического параметра, в частности расхода, по заданной программе.

Пользуясь математическим аппаратом гидродинамических аналогий и программируя соответствующим образом регулятор внутреннего контура, можно создавать физические модели объектов регулирования (включая различные исполнительные механизмы). Внешний контроллер при этом поможет подобрать настройки ПИД-регулятора для моделируемого объекта.

### 4. Принципы физического моделирования

Благодаря тому, что физические процессы, протекающие в гидродинамических системах, могут быть схожи при совершенно разных диаметрах, скоростях и т.д., на данном стенде может быть смоделированы процессы, протекающие в реально существующих трубопроводных контурах. Справедливость моделирования можно оценить, сравнивая критерии подобия – безразмерные величины, составленные из размерных физических параметров, равенство которых для разных физических явлений и систем является необходимым и достаточным условием для физического подобия этих систем.

Гидродинамическое подобие характеризуется числом Рейнольдса ( $Re$ ), представляющим отношение инерционных сил при движении несжимаемой и сжимаемой жидкости к силам вязкости:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\nu},$$

где  $\rho$  – плотность протекающей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость, м/с;  $d$  – эквивалентный диаметр, в круглых трубах равный геометрическому диаметру, м;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Таблица 1

**Числа Рейнольдса для воды с температурой 5 °С**

Re (5 °С)*10 <sup>-4</sup>		$\nu$ , м/с							
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$d$ , м	0,05	0,323	0,646	0,969	1,29	1,62	1,94	2,26	2,58
	0,1	0,646	1,29	1,94	2,58	3,23	3,88	4,52	5,17
	0,15	0,969	1,94	2,91	3,88	4,85	5,82	6,79	7,75
	0,2	1,29	2,58	3,88	5,17	6,46	7,75	9,05	10,3
	0,25	1,62	3,23	4,85	6,46	8,08	9,69	11,3	12,9
	0,3	1,94	3,88	5,82	7,75	9,69	11,6	13,6	15,5

Таблица 2

**Числа Рейнольдса для воды с температурой 40 °С**

Re (40 °С)		$\nu$ , м/с		
		0,1	0,2	0,3
$d$ , м	0,05	7,59*10 <sup>3</sup>	1,52*10 <sup>4</sup>	2,28*10 <sup>4</sup>
	0,1	1,52*10 <sup>4</sup>	3,03*10 <sup>4</sup>	4,55*10 <sup>4</sup>
	0,15	2,28*10 <sup>4</sup>	4,55*10 <sup>4</sup>	6,83*10 <sup>4</sup>
	0,2	3,03*10 <sup>4</sup>	6,07*10 <sup>4</sup>	9,10*10 <sup>4</sup>

В таблицах 1 и 2 представлены расчетные значения чисел Рейнольдса для воды с температурой 5 °С («сырая вода») и 40 °С («обратная сетевая вода») соответственно. Цветом выделены режимы, которые могут быть смоделированы на лабораторном стенде в данной конфигурации оборудования.

Физическая модель позволяет проанализировать качество переходного процесса при различных сочетаниях настроек ПИД-регулятора, определить границы общей и колебательной неустойчивости. Применение частотного преобразователя в качестве исполнительного механизма обеспечивает надежность работы стенда в сложных случаях изменения регулируемого параметра, особенно расхода.

### 5. Пример физического моделирования

Физическое моделирование особенно актуально для поиска оптимальных настроек АСР регулирования «расхода по расходу» с ПИД-регулятором, так как этот случай трудно поддается математическому моделированию. Подбор настроек на реальном объекте для этих систем осложняется возможностью попадания при определенном сочетании настроек ПИД-регулятора, в колебательную неустойчивость расхода, которая является опасным режимом для реальной конструкции.

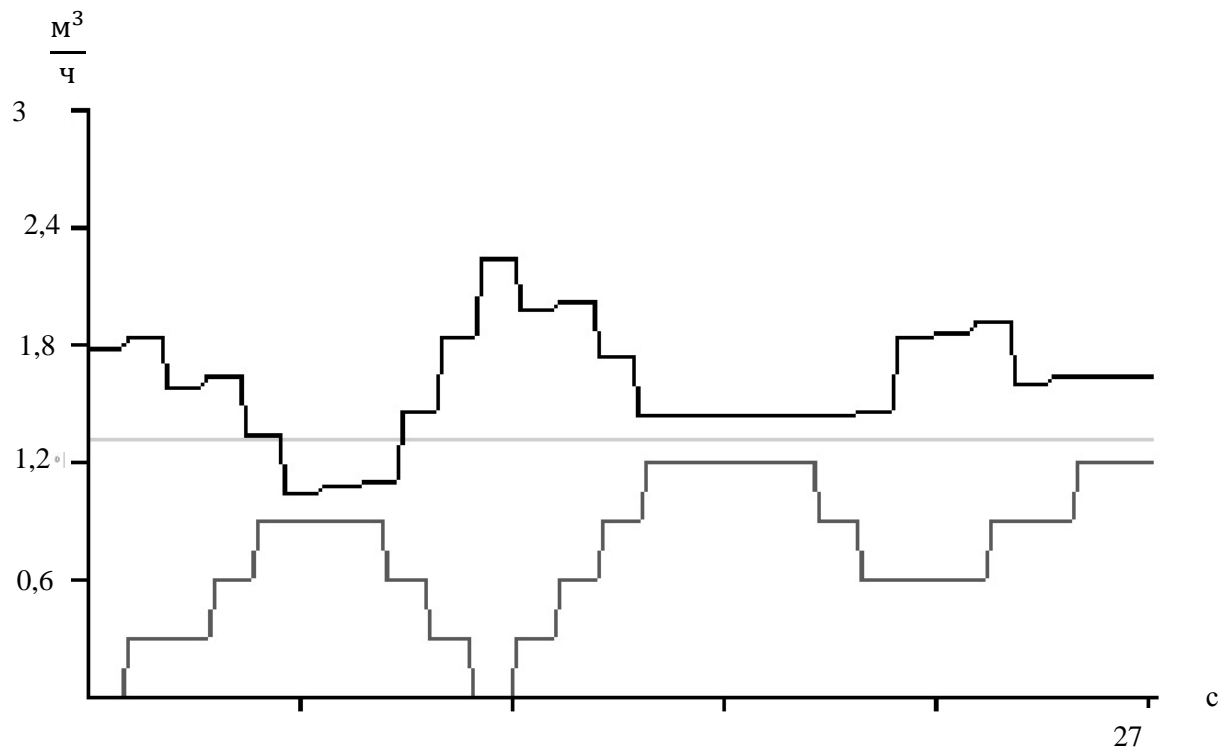


Рис 3. Колебательный переходный процесс измеряемой величины (расхода) при  $K_p = 8,5$

На рис. 1 приведен пример моделирования колебательной неустойчивости на стенде.

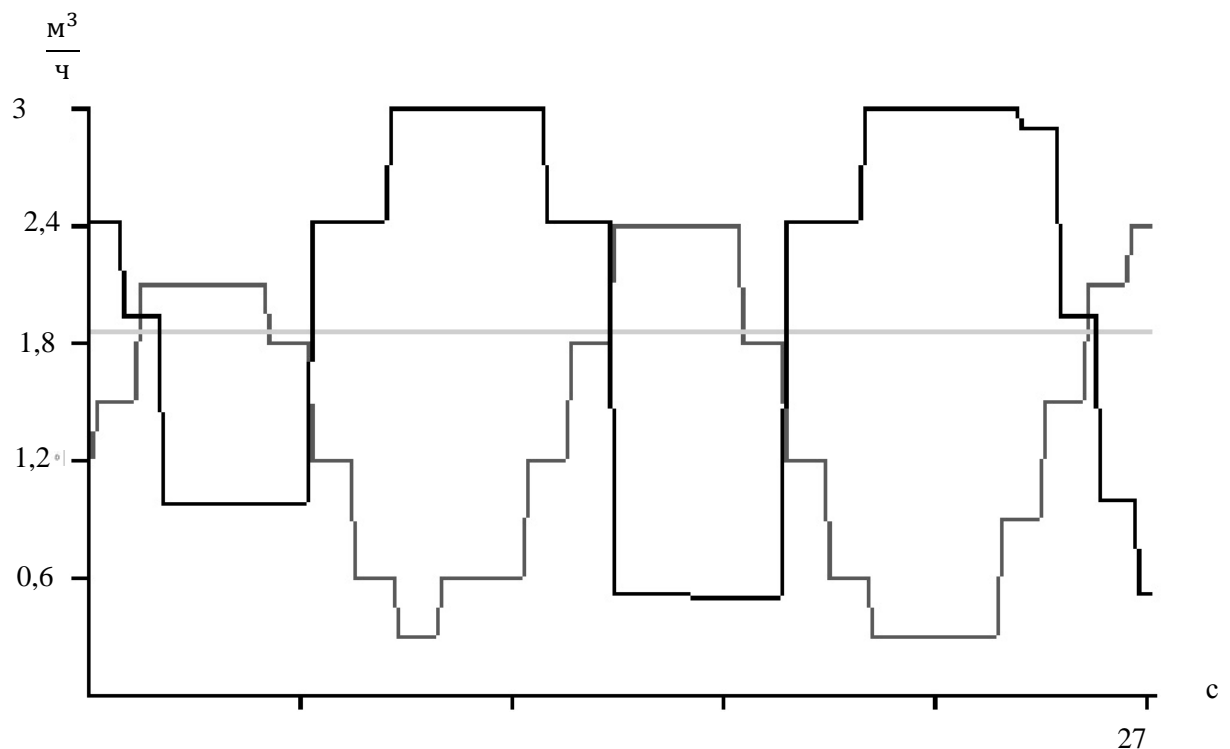


Рис. 4. Колебательный переходный процесс измеряемой величины (расхода) при  $K_p = 18,9$

## 6. Заключение

Представленный в работе гидравлический стенд позволяет безопасно изучать настройки ПИД-регулятора, приводящие к неустойчивости, для АСР «расход по расходу»,

не подвергая опасности реальные гидравлические системы. Дополнительное приложение стенда — калибровка расходомеров.

#### **Список литературы**

1. Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Турбостроение». — 2-е изд., пераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.: ил.
2. Измерение расхода жидкости методом переменного перепада давления: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» / Р.В. Радченко, Н.Н. Акифьева, А.С. Петров, Г.Н. Суняйкин. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. 33 с.